

氏 名	むら かし こう じ 村 上 浩 二
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	工 博 第 2467 号
学位授与の日付	平 成 17 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻	工 学 研 究 科 材 料 工 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	Surface Modification of High Purity Iron and Stainless Steel by Aluminization and Plasma Nitridation (Al 拡散浸透処理とプラズマ窒化処理による高純度鉄とステンレス鋼の表面 改質)
論文調査委員	(主 査) 教 授 長 村 光 造 教 授 牧 正 志 教 授 落 合 庄 治 郎

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は Al 拡散浸透処理とプラズマ窒化処理による高純度鉄とステンレス鋼の表面改質に関する基礎研究を取りまとめたもので、5 章からなっている。

第 1 章は序論であり、研究の背景である Al と N の拡散浸透処理技術の現状とその問題点を調査し、本研究の目的を述べている。

第 2 章では粉末塗布・熱処理による Al 拡散方法（粉末液層被覆法）について、高純度 Fe を基板として用いた場合、その反応機構を解明した。Al と Ti の混合体の場合は熱処理で融解した Al のうち、基板表面のものが被覆に関与する一方で、余剰の Al は Ti と反応し剝離除去された。Al と Al_2O_3 を用いた場合は、 Al_2O_3 粉末の間隙に余剰の Al が捕獲され、基板表面を被覆する Al 量が制御された。濃度に依存する相互拡散係数を含む偏微分方程式を差分方程式に変換し、解の精度向上と安定性を得るため Crank-Nicholson が提唱した差分生成法に基づき、Fe 中の Al 濃度の時間発展を求めた。拡散処理中の Al 拡散領域は $\alpha\text{-Fe (Al)}$ であるが、基板は $\gamma\text{-Fe}$ であり、Al の拡散と共に、その界面の移動を考慮した結果、実験結果とよく一致する計算結果が得られることを明らかにした。

第 3 章では合金元素として Cr, Ni を含むステンレス鋼に対する Al 拡散浸透処理の結果をまとめている。Cr を含むフェライト系ステンレス鋼では、Al 拡散層・基板共に処理中はフェライト状態であり、各元素の組成は深さ方向に緩やかに変化した。処理温度が高い場合は Al 拡散層が深さ方向に柱状組織を示す一方で、処理温度が低い場合は、基板の粒界が保存されることが示された。Cr, Ni を含むオーステナイト系ステンレス鋼では、Ni と Al の親和性が高いことから、基板表面とそこに付着した溶融 Al との界面に Al-Ni 濃化層が形成された。この濃化層を介し、表面から基板内部への Al 供給、ならびに基板内部から表面への Fe, Cr, Ni の拡散が起こったが、これは各元素の濃度勾配から推測される方向とは逆の uphill 拡散によるものであった。この現象を説明するにあたり、第 2 章の差分スキームを多元系拡散方程式に適用した。つまり表面近傍の Al-Ni 濃化領域は規則化した B2 構造、基板側の低 Al 濃度領域は bcc 構造、基板は fcc 構造であり、それぞれの層において濃度に依存する相互拡散係数、B2/bcc および bcc/fcc 界面の移動を考慮し計算した結果、Al と Ni との親和力が駆動力となって uphill 拡散が起こること、拡散速度の遅い B2 領域が基板側への Al 供給量を律速し、これに比べて 1 桁以上相互拡散係数の大きい bcc 領域はほぼ定常状態で、直線状の濃度プロファイルを示した。これらの計算結果は定性的にほぼ全体の実験事実をよく説明することを明らかにしている。

第 4 章では高純度 Fe 基板に Al を拡散浸透させた後、プラズマ窒化を行うと硬度が非常に高くなる原因を解明した。プラズマ窒化によって生成する析出相のうち、板状に析出した岩塩型 AlN が硬化の主要因であるとの結論を得た。窒素の拡散に伴って岩塩型 AlN が析出する反応拡散過程について、その定式化を行った。表面から基板内部に向かって溶質 (Al) 濃度が傾斜し、さらに表面から別種の溶質元素 (N) が供給され、その拡散に伴って析出物が生成する反応拡散について考察を行った。ここではプラズマ窒化中に表面から供給された N が、 $\alpha\text{-Fe (Al)}$ 中の固溶 Al に捕獲されて AlN が生成する

と考え、 α -Fe (Al) 中 N 濃度の時間発展を表す拡散方程式、ならびに AlN 体積率の時間発展を表す偏微分方程式を導出した。後者については、AlN の生成は反応律速であると考え、その速度が α -Fe (Al) 中の Al 量ならびに N 量に対して n 次反応で与えられると仮定し、その反応速度定数を K において計算を行った。その結果、この K を変化させることで、 α -Fe (Al) 中の Al が N を捕獲する頻度が変化する、 K の値が小さい場合は Al 拡散層の内部で N 濃度が緩やかに変化する一方、それが大きい場合は Al 拡散層の内部で N 濃度が急減するという、実験結果に近い計算結果が得られた。これは、 α -Fe (Al) 中の Al が N を捕獲する頻度が高い場合は、ある領域に存在する Al がほぼ完全に N と結合し、不活性化してはじめて、N がそれよりも内部へと拡散可能になることを示したものである。

第 5 章は結論であり、本論文で得られた成果を要約している。

論文審査の結果の要旨

鉄鋼材料の表面処理・硬化法の一手法である Al と N の拡散浸透処理法について論じた結果をとりまとめたもので、得られた主な成果は次の通りである。

- (1) アルミナライジングに必要とされる Fe-Al 合金層の Al 濃度を 10at% 以下とし、複雑形状部品にも有効な「粉末液層被覆法」を開発した。粉末の混合比や熱処理温度・時間を調整することで、適切な Al 濃度の拡散層を得ることが可能で、その条件を定量化するため相互拡散係数が組成に依存して変化することを考慮して、偏微分方程式を差分方程式に変換することで、Al 濃度の時間発展を求めた。Al 拡散領域は α -Fe (Al) で、基板は γ -Fe であり Al の拡散と共にその α/γ 界面が移動をすることを考慮した結果、実験結果とよく一致する結果が得られた。
- (2) Cr, Ni を含むステンレス鋼に対して Al 拡散浸透処理を行った。Cr を含むフェライト系ステンレス鋼では、Al 拡散層・基板共に処理中はフェライトであり、各元素の組成は深さ方向に緩やかに変化した。Cr, Ni を含むオーステナイト系ステンレス鋼では、界面の濃化層を介し表面から基板内部への Al 供給拡散、ならびに基板内部から表面への Fe, Cr, Ni の uphill 拡散が起こったが、差分方程式により多元系拡散方程式を解析した結果、Al と Ni との親和力が駆動力となって、この uphill 拡散が起こることが説明された。
- (3) 高純度 Fe 基板に Al を拡散浸透させた後プラズマ窒化を行うと HV1000 以上の硬さが得られるのは板状に析出した岩塩型 AlN が硬化の原因であるとの結論を得た。窒素の拡散に伴い AlN が析出する反応拡散過程で AlN の生成が反応律速であると考え、その反応速度定数を K において計算を行った。 K の値が小さい場合は Al 拡散層の内部で N 濃度が緩やかに変化する一方、それが大きい場合は Al 拡散層の内部で N 濃度が急減するという実験を説明できる計算結果が得られた。

以上要するに本論文は、鉄鋼材料のアルミニウム、窒素の拡散浸透処理法に関する基礎研究の成果をまとめ、その実用化の可能性を実証したものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また平成16年12月24日に論文内容とそれに関連した事項についての試問を行った結果、合格と認めた。